

На правах рукописи



**ХАЦАЮК МАКСИМ ЮРЬЕВИЧ**

**ИНДУКЦИОННАЯ УСТАНОВКА С МГД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА  
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ В  
ПРОЦЕССЕ ИХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗЛИВКИ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электротехнология и электротехника» в  
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Первухин Михаил Викторович**

Официальные оппоненты: **Сидоров Олег Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Нижнетагильский технологический  
институт (филиал) ФГАОУ ВПО  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина», профессор кафедры химии

**Федорова Светлана Владимировна**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВПО «Российский  
государственный профессионально-  
педагогический университет»,  
заведующая кафедрой  
"Автоматизированных систем  
электроснабжения" института  
электроэнергетики и информатики

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Новосибирский  
государственный технический  
университет»

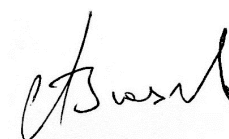
Защита состоится 16 октября 2013 года в 14 часов 15 минут на заседании  
диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
по адресу:

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-217

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан «9» сентября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.т.н.



Зюзов А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Потребность в специальных алюминиевых сплавах ключевыми отраслями российской экономики обуславливает рост требований, предъявляемых к их качеству и эксплуатационным характеристикам. Обеспечить требуемое качество позволяет использование современного эффективного оборудования, обеспечивающего воздействие на расплав в течение всего производственного цикла – от приготовления до разливки. Особая роль при этом отводится оборудованию для получения непрерывнолитой заготовки (прутка) из высоколегированных алюминиевых сплавов.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности оборудования для приготовления и непрерывной разливки сплавов цветных металлов является применение управляемого магнитогидродинамического (МГД) перемешивания в процессе приготовления сплава и его кристаллизации. В совокупности с высокими скоростями охлаждения, МГД перемешивание расплава способствует получению равномерного химического состава и кристаллической структуры по сечению и длине непрерывнолитого слитка.

Проведенный анализ показал, что обеспечить совокупное воздействие на расплав указанных выше факторов, позволяет индукционная установка, основанная на принципе литья слитков малого поперечного сечения в электромагнитный кристаллизатор. Такой подход позволяет получить высокие скорости охлаждения слитка и МГД воздействие на кристаллизующийся слиток в процессе литья. В качестве плавильной печи, в совокупности с электромагнитным кристаллизатором, целесообразно использовать индукционную тигельную печь с электропроводным тиглем, оснащенную МГД-перемешивателем расплава. При этом обеспечивается высокая равномерность химического состава и температуры в объеме расплава, уменьшается время его приготовления и выдержки, что позволяет обеспечить стабильность параметров на всем протяжении процесса литья и высокое качество непрерывнолитого слитка по всей его длине.

Электромагнитные параметры, входящего в состав индукционной установки оборудования, определяют совокупность тепловых и гидродинамических процессов, протекающих при ее эксплуатации, и влияют на качество конечной продукции. Поэтому, наибольшая эффективность установки может быть получена на основе синтеза электромагнитных параметров индукционной тигельной печи и электромагнитного кристаллизатора. В свою очередь, синтез может быть осуществлен на основе глубокого знания электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в указанном оборудовании, их взаимного влияния и влияния на качество непрерывнолитых алюминиевых слитков.

Вопросами исследования физических процессов, протекающих в оборудовании, входящем в состав индукционной установки, занимались российские ученые Л.А. Верте, И.М. Кирко, А.Б. Капуста и З.Н. Гецелев,

В.Н. Тимофеев, Ф.Н. Сарапулов, Р.М. Христинич, М.В. Первухин др. Среди зарубежных ученых широко известны работы А. Jakovics, E. Baake, B. Nacke и др.

Разработка, модернизация и оптимизация индукционного оборудования металлургического назначения связаны с исследованием физических процессов в агрессивных средах с высокими температурами, что существенно ограничивает возможность проведения физических экспериментов. Поэтому, основным инструментом исследований становится математическое моделирование. Благодаря развитию математического аппарата и росту вычислительных мощностей, стало возможным применение прямого численного моделирования для решения задач магнитной гидродинамики в сложных системах. Таким образом, становится актуальным развитие методов математического моделирования индукционного оборудования металлургического назначения с использованием современных моделей для выявления новых закономерностей протекания физических процессов в сложных магнитогидродинамических системах, с целью повышения их эффективности.

**Объект исследования.** Индукционная установка для получения непрерывнолитого слитка из высоколегированных алюминиевых сплавов с МГД воздействием на расплав в процессе его приготовления и разливки.

**Предмет исследования.** Электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы, протекающие в индукционной установке, в процессе приготовления и разливки алюминиевых сплавов, их взаимосвязь с конструктивными и электромагнитными параметрами и режимами ее работы.

**Целью работы** является исследование физических процессов в индукционной установке с МГД воздействием на алюминиевые сплавы в процессе приготовления и разливки и развитие методов численного анализа, с точки зрения обеспечения высокой точности и эффективности процесса ее эксплуатации.

**Задачи:**

1. Проведение анализа и обобщение опыта эксплуатации существующего металлургического оборудования с использованием МГД воздействия на алюминиевый сплав.
2. Анализ физических процессов, протекающих в индукционном оборудовании, при МГД перемешивании расплава в процессе его приготовления и кристаллизации, с целью обоснованного выбора программного продукта для их математического моделирования.
3. Построение математических моделей, позволяющих проводить анализ связанных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, выявлять закономерности их протекания и их влияние на электромагнитные параметры установки и качество получаемой продукции.
4. Проведение экспериментальных исследований на опытной индукционной установке с МГД воздействием на алюминиевый сплав в процессе приготовления и разливки, с целью верификации результатов, полученных на математических моделях.

5. Выбор и обоснование технических решений и рекомендаций по повышению эффективности преобразования энергии в индукционной установке с МГД воздействием на алюминиевый сплав в процессе его приготовления и разлива.

**Методы исследования.** Математическое моделирование осуществлялось с применением метода конечных элементов (МКЭ), для решения задачи электродинамики, и метода конечных объемов (МКО), для решения задачи термогидродинамики. Для решения задачи течения жидкости, с учетом кристаллизации и плавления тела, применялся метод «энтальпия–пористость». Для реализации решения уравнений на основе указанных методов использовались современные CAE системы ANSYS (МКЭ) и Fluent (МКО). Для передачи и интерполяции данных между системами ANSYS и Fluent использовалась внешняя программа, реализованная на языке C++. Интерполяция осуществлялась методом «ближний сосед» с восстановлением регрессии на основании формулы Надарая–Ватсона.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Построены сопряженные математические модели для анализа электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в системах «индуктор – расплав» и «индуктор – слиток», учитывающие динамику турбулентных пульсаций в расплаве и кристаллизующемся слитке, и их влияние на термогидродинамические процессы в индукционной установке.

2. На основании построенных сопряженных математических моделей выявлено влияние механической энергии, передающейся электромагнитным полем в расплав на тепловые и гидродинамические процессы, протекающие в индукционной установке, а именно:

- увеличение на 30% эффективной теплопроводности расплава (до  $130 \text{ Вт/(м·К)}$ ) за счет применения МГД перемешивания, что приводит к интенсификации процессов теплообмена в печи и кристаллизующемся расплаве;

- увеличение энергии турбулентных пульсаций в расплаве до  $0,8 \text{ мДж}$ , что приводит к интенсификации механического воздействия на кристаллизующийся расплав и обеспечивает равномерную мелкозернистую структуру слитка.

3. Определена комбинация синтезируемых параметров оборудования индукционной установки, обеспечивающая режим работы, при котором осуществляется устойчивое формирование слитка с равномерным распределением свойств как в поперечном сечении, так и по его длине.

**Значение для теории.** Проведен анализ и исследование закономерностей протекания физических явлений, лежащих в основе функционирования электромеханических преобразователей энергии.

**Практическая значимость:**

1. Разработаны и реализованы алгоритмы: передачи и интерполяции источниковых членов уравнений движения и энергии для магнитогидродинамической задачи; определения энергетических параметров,

обеспечивающих устойчивое формирование слитка заданного диаметра; определения параметров схемы замещения системы «индуктор – слиток» на основании результатов решения электромагнитной задачи.

2. Выданы рекомендации по выбору параметров магнитогидродинамического перемешивателя и электромагнитного кристаллизатора, обеспечивающих эффективную работу индукционной установки в требуемых технологических режимах. Спроектирована и создана опытно–промышленная установка.

3. Получен патент на способ получения слитка из сплавов цветных металлов №201106625.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена верификацией результатов математического моделирования температурного поля тигля на действующем опытно-промышленном плавильно-литейном комплексе. Проверка построенной математической модели проведена путем сравнения результатов моделирования нестационарных гидродинамических процессов с известными измерениями динамики поля скоростей магнитными датчиками, полученными для индукционной тигельной печи.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы были использованы: при разработке комплекса для получения прутковой заготовки и определении электромагнитных параметров оборудования техническими специалистами ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» по договорам с ООО «Конэкс» и ООО «Эльта»; при усовершенствовании технологии непрерывного литья прутков и полос из ювелирных сплавов по договорам с ОАО «Красноярский завод цветных металлов имени В.Н. Гулидова»; при создании опытного производственного комплекса для получения прутковой заготовки из алюминиевых сплавов на территории Красноярского опытного завода ГОСНИТИ; в учебном процессе при подготовке магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и учебных материалов для магистров Российских и Европейских университетов по проекту TEMPUS-2010 «PhD Education in Energy Efficient Electrotechnologies at Russian Universities».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 4-8 мая 2009 г.); VII Международной конференции пользователей ANSYS (г. Москва, 27-29 октября 2009 г.); Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи НТТМ-2009 (г. Москва, 24-27 июня 2009 г.); Международной научно-технической конференции «Успехи современной электротехнологии» (г. Саратов, 20-25 октября 2009 г.); X Международной научно-практической конференции «Интеллект и наука» (г. Красноярск, 3-5 мая 2010 г.); VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука» (г. Красноярск, 6-9 апреля 2010 г.); Международной выставке «Алюминий Сибири» (г. Красноярск, 8-10 сентября 2009, 2-4 сентября 2010 г.); Международной

конференции «Алюминий Сибири» (г. Красноярск, 7-9 сентября 2011 г., 5-7 сентября 2012 г.); XVII Международном конгрессе UIE-2012 «Energy efficient, economically sound, ecologically respectful, educationally enforced electrotechnologies» (г. Санкт-Петербург, 21-25 мая 2012 г.); VI Международной конференции и выставке «Алюминий-21/Рециклинг» (г. Москва, 9-11 апреля 2013 г.), International Conference on Heating by Electromagnetic Sources HES-13 (г. Падуя, 21-24 мая 2013 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 27 работ, в том числе 8 статей в изданиях по перечню ВАК, 1 патент РФ на изобретение, 4 свидетельства государственной регистрации программы для ЭВМ, 14 публикаций в сборниках международных и всероссийских научно-практических конференций и семинаров, межвузовских сборниках научных трудов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов с выводами, заключения, списка использованных источников и 3 приложений. Основная часть работы изложена на 151 страницах, содержит 7 таблиц и 78 рисунков. Список использованных источников включает 101 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, указаны цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверность полученных результатов.

**В первой главе** проведен анализ способов и устройств магнитогидродинамического воздействия на расплавы в процессе их приготовления и разливки; проведен обзор и обоснование выбора комплексов программ и методов моделирования магнитогидродинамических процессов, с учетом их турбулентного характера и процессов кристаллизации; выполнена постановка задачи исследования и разработки индукционной установки для получения прутковой заготовки.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности плавления-литейных установок, одновременно с удовлетворением высоких требований к качеству получаемой продукции, является применение управляемого МГД воздействия на стадиях приготовления и разливки расплава. Применение МГД воздействия на стадии приготовления позволяет выравнивать температурное поле и концентрацию химических компонентов в объеме расплава, а также снизить длительность его выдержки. Из анализа методов физического воздействия на жидкий металл в процессе его приготовления сделан вывод, что среди электромагнитных способов и устройств для перемешивания применительно к индукционной печи с графитовым тиглем в футерованном каркасе с плоскими стенками, наиболее эффективным и удобным является статор линейной индукционной машины.

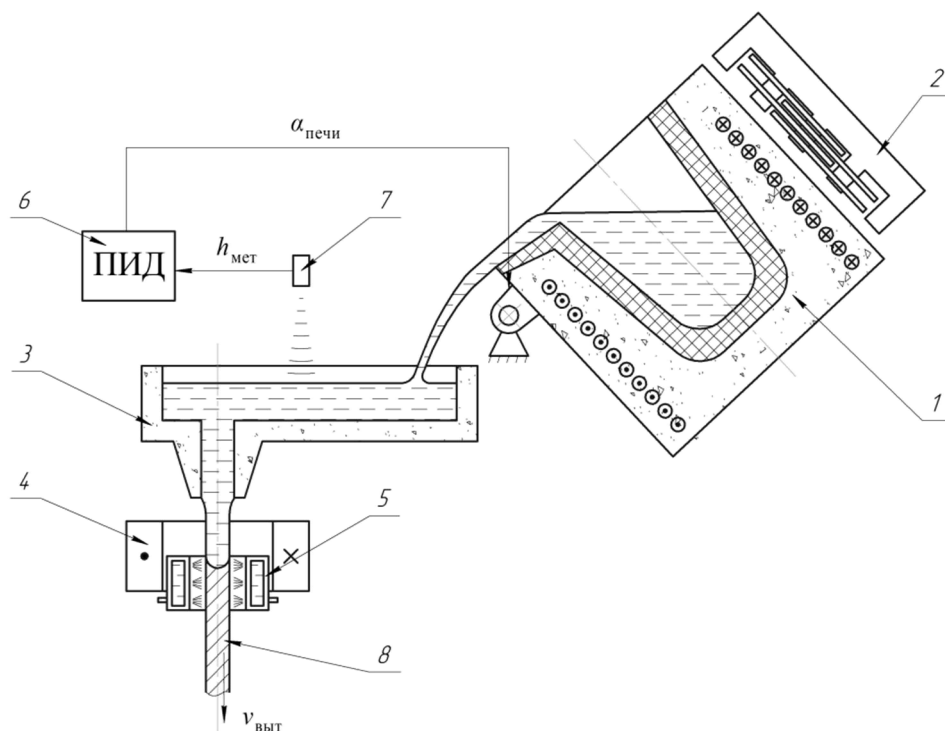


Рис. 1

На стадии литья слитка применение интенсивного электромагнитного перемешивания позволяет повысить скорость кристаллизации и выровнять условия теплообмена в области фазового перехода. Это обеспечивает повышение качества слитка, выражающееся в равномерной и мелкодисперсной кристаллической структуре в его поперечном сечении. Литье в электромагнитный кристаллизатор позволяет обеспечивать высокую скорость охлаждения слитка, одновременно с созданием интенсивных гидродинамических течений металла в области кристаллизации.

Для повышения эффективности плавильно-литейных установок и улучшения структуры по длине и поперечному сечению получаемых с их помощью непрерывно литых прутковых заготовок, предложена схема индукционной установки с МГД воздействием на стадиях приготовления и разливки высоколегированного сплава алюминия (рисунок 1).

Приготовление расплава осуществляется в печи 1 одновременно с обеспечением гидродинамических течений, возникающих за счет силового действия МГД перемешивателя 2. Далее расплав транспортируется через лоток 3 и разливается в электромагнитный кристаллизатор. Уровень металла  $h_{мет}$  в лотке поддерживается постоянным за счет управления сливом металла из тигельной печи. Слив металла осуществляется за счет наклона тигельной печи. Управление углом наклона печи  $\alpha_{печи}$  выполняется регулятором 6 на основании обработки сигналов от датчика 7. Расплав, поступая в электромагнитный кристаллизатор, удерживается от растекания электромагнитным полем индуктора 4. За счет действия охлаждающей воды из охладителя 5 расплав непрерывно затвердевает, формируя слиток 8, и отводится вниз со скоростью  $v_{выт}$ .



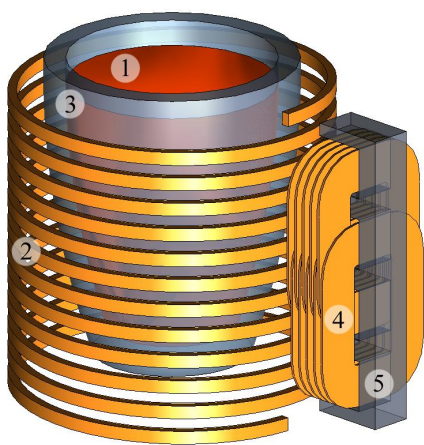


Рис. 2

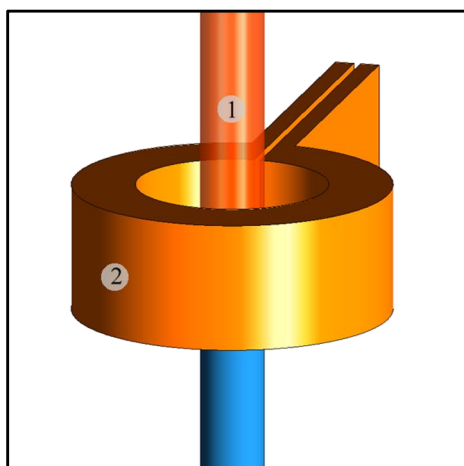


Рис. 3

Для исследования протекающих в предлагаемой установке физических процессов, установления зависимостей и определения оптимальных параметров работы комплекса необходимо провести численное и физическое моделирование. Исходя из обзора и анализа методов математического моделирования МГД процессов, с учетом кристаллизации и комплексов программ, выбор сделан в пользу связки программ ANSYS и Fluent.

Во второй главе предложена сопряженная математическая модель электромагнитных и термогидродинамических процессов, протекающих в индукционной установке, учитывающая динамику турбулентных течений и процессы кристаллизации. Геометрия расчетных областей модели представлена на рисунках 2 и 3.

Плавильный узел индукционной установки, представленный на рисунке 2, состоит из тигля 3 с расплавом 1, многовиткового индуктора 2 и МГД перемешивателя, состоящего из

перекрещивающихся катушек 4 и магнитопровода 5. Литейный узел индукционной установки (рисунок 3) состоит из слитка 1 и индуктора 2.

Для предварительной оценки физических процессов, протекающих в индукционной установке, был выполнен расчет и анализ критериев подобия:

- магнитное число Рейнольдса  $Re_m < 0,2$  – электромагнитную задачу можно решать без учета влияния поля скоростей в металле;
- число Гартмана  $Ha > 29$  – электромагнитное поле оказывает существенное влияние на движение расплава;
- число Рейнольдса  $Re > 12000$  – режим течений турбулентный, требуется использование моделей турбулентности;
- число Рэлея  $Ra > 1330$  – возможно возникновение свободноконвективных течений, требуется учет теплового расширения жидкого металла.

Таким образом, приняты следующие допущения модели:

- цилиндрический слиток имеет бесконечно большие размеры в направлении вертикальной оси;
- электромагнитное поле в расчетной области изменяется по гармоническому закону и в системе «индуктор – слиток» в 2D постановке имеет осевую симметрию;

- влиянием движения металла в объеме слитка и тигля и поступательным движением слитка на магнитное поле пренебрегаем.

С учетом постановки задачи и принятых допущений, система уравнений, описывающих магнитогидродинамические процессы в системах, состоящая из уравнения векторного потенциала (1), непрерывности (2), неразрывности (3), движения (4) и энергии (5), имеет вид:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_a \dot{\mathbf{\delta}}, \quad (1)$$

$$\nabla \dot{\mathbf{\delta}} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_0 \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho_0 \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} + \rho(T) \mathbf{g} + \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \xi)} A |\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{выт}}| + \mathbf{f}_{\text{эм}}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_0 H}{\partial t} + \nabla(\rho_0 \mathbf{v} H) = \nabla(\lambda \nabla T) + q_{\text{эм}}. \quad (5)$$

При этом вектор плотности тока имеет следующий вид:

$$\dot{\mathbf{\delta}} = -\gamma j \omega \dot{\mathbf{A}}. \quad (6)$$

Для учета свободноконвективных движений используется приближение Буссинеска–Обербека:

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)). \quad (7)$$

В уравнениях (1–7)  $\mathbf{A}$  – векторный потенциал;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $\dot{\mathbf{\delta}}$  – вектор плотности тока;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости;  $t$  – время;  $\rho_0$  – плотность жидкости при температуре  $T_0$ ;  $p$  – давление;  $\boldsymbol{\tau}$  – тензор вязких напряжений;  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения;  $\beta$  – коэффициент линейного теплового расширения;  $\xi$  – малое число, предотвращающее деление на 0;  $A$  – постоянная двухфазной зоны;  $\mathbf{v}_{\text{выт}}$  – скорость вытягивания;  $\mathbf{f}_{\text{эм}}$  – вектор силы Лоренца;  $H = h + \beta' L$  – энтальпия с учетом кристаллизации и плавления;  $h$  – энтальпия;  $\beta'$  – доля жидкой фазы;  $L$  – скрытая теплота материала;  $\lambda$  – теплопроводность;  $T$  – температура;  $q_{\text{эм}}$  – Джоулева энергия;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость;  $\omega$  – циклическая частота электромагнитного поля.

Поскольку на основании предварительной оценки характера течений следует ожидать турбулизации потоков, необходимо использование моделей турбулентности.

При осреднении Рейнольдса скорость раскладывается на усредненную во времени и пульсационную составляющую. С учетом этого, в уравнении движения появляется дополнительная составляющая тензора вязких напряжений, тензор напряжений Рейнольдса. Для моделирования турбулентности методом осреднения Рейнольдса использовалась модель переноса касательных напряжений Ментера (SST – Shear Stress Transport). В этом случае турбулентная вязкость, входящая в тензор напряжений Рейнольдса:

$$\mu_t = \rho_0 \frac{k}{\omega} C, \quad (8)$$

где  $C$  – эмпирическая постоянная, значение которой также переключается в зависимости от расположения относительно пристеночного течения;  $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;  $\omega$  – удельная скорость диссипации.

При использовании моделей турбулентности теплопроводность, входящая в выражение (5), называется эффективной теплопроводностью:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \frac{c \mu_t}{Pr_t}, \quad (9)$$

где  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля;  $c$  – теплоемкость.

Полное прямое численное моделирование, в связи с высокими требованиями к вычислительным ресурсам при больших числах Рейнольдса, применяется в редких случаях. Более распространено прямое численное моделирование турбулентности с использованием подсеточного моделирования микромасштабной турбулентности (LES). Суть метода заключается в том, что крупные вихри рассчитываются явно, а более мелкие моделируются с использованием правил подсеточного замыкания (SGS – subgrid-scale). Наиболее популярной LES моделью является модель Смагоринского–Лилли. Турбулентная вязкость в этом случае определяется как:

$$\mu_t = \rho_0 (C_s V^{1/3})^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}, \quad (10)$$

где  $C_s$  – подстраиваемая постоянная Смагоринского. Было установлено, что значения около 0,1, дают лучшие результаты для широкого диапазона потоков;  $V$  – объем расчетной ячейки;  $\bar{S}_{ij}$  – скорость деформации.

В электромагнитной задаче принято, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ( $\mu = \infty$ ). В термогидродинамической задаче принято, что для границ входа и выхода выполняется условие Неймана и условие Дирихле. Для границ, соответствующих стенкам жидкого объема, выполняется условие прилипания. Теплообмен стенок с окружающей средой происходит по закону Ньютона–Рихмана. В соответствии с этим, граничные условия модели имеют вид:

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_\tau}{\partial n} = 0, \dot{\mathbf{A}}_n = 0, \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, p = 0, \mathbf{v} = 0, -\lambda \nabla T = \alpha (T_{\text{пов}} - T_{\text{ос}}). \quad (14)$$

Здесь  $n$  – нормаль к поверхности расчетной области;  $\phi$  – множество всех величин, использующихся при решении термогидродинамической задачи;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Шаг по времени выберется из условия Куранта:

$$\Delta t \leq C_\tau \frac{h_{\min}}{v_0}, \quad (15)$$

где  $C_\tau$  – число Куранта принимается равным 0,8;  $h_{min}$  – минимальный размер элемента.

В третьей главе проводится анализ интегральных и дифференциальных характеристик электромагнитных и термогидродинамических полей для различных геометрических и энергетических параметров индукционной установки.

В результате решения электромагнитной задачи, получено распределение векторного потенциала, однако для анализа больший интерес представляют такие дифференциальные величины, как наведенная плотность тока, индукция, напряженность электрического и магнитного полей, объемная электромагнитная сила и джоулева энергия. Магнитная индукция и напряженность электрического и магнитного полей, плотность тока могут быть выражены через векторный потенциал следующим образом:

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \dot{\mathbf{A}}, \quad \dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{A}}, \quad \dot{\mathbf{H}} = \frac{\dot{\mathbf{B}}}{\mu_a}, \quad \dot{\boldsymbol{\delta}} = \gamma \dot{\mathbf{E}}. \quad (16)$$

Средняя за период плотность электромагнитных сил и удельная мощность теплового выделения определяются из выражений:

$$\mathbf{f}_{эм} = \frac{1}{2} \text{Re}(\boldsymbol{\delta}^* \times \dot{\mathbf{B}}), \quad q_{эм} = \frac{1}{2} \gamma \dot{\mathbf{E}}^2. \quad (17)$$

Картины распределения в области тигельной печи действующего значения магнитной индукции, возникающей от индуктора тигельной печи и МГД перемешивателя, представлены на рисунке 4. Поскольку индуктор тигельной печи служит для нагрева, а МГД перемешиватель для приведения расплава в движение, интерес представляет распределение джоулевой энергии (рисунок 5) и электромагнитных сил (рисунок 6 и 7), возникающих от действия индуктора печи и от МГД перемешивателя соответственно.

Как видно из рисунков, магнитное поле с частотой 18 кГц, создаваемое индуктором тигельной печи, полностью экранируется графитовым тиглем, т.е. не оказывает силового действия на расплав и, в этом случае, вынужденная конвекция отсутствует. Бегущее магнитное поле с частотой 50

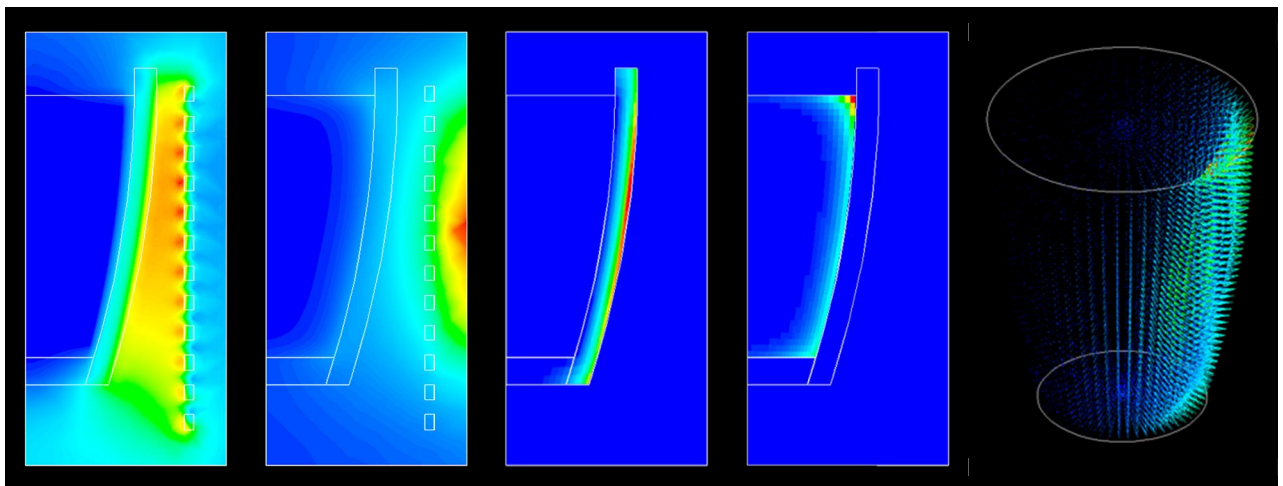


Рис. 4

Рис. 5

Рис. 6

Рис. 7

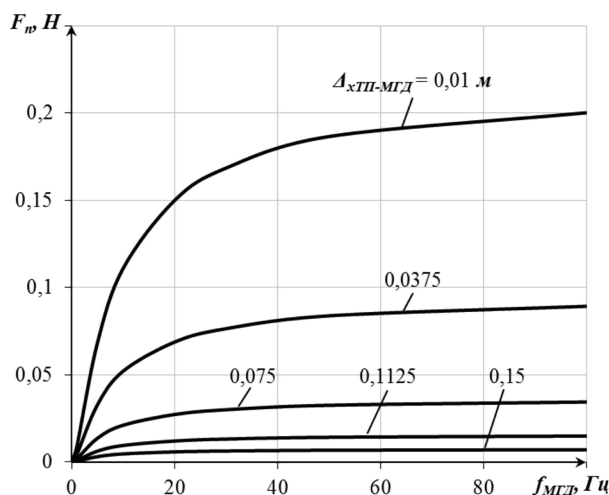


Рис. 8

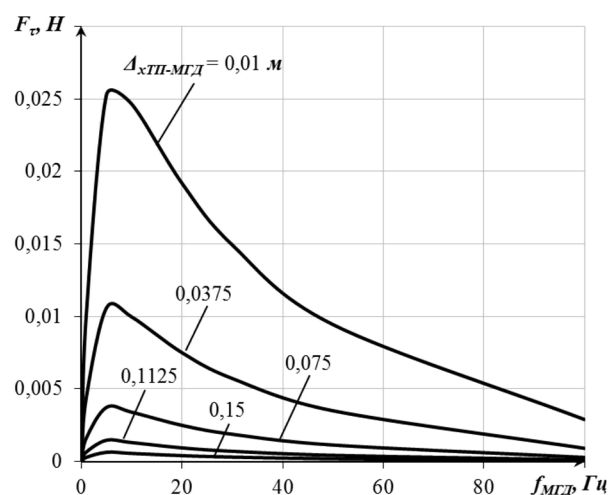


Рис. 9

Гц МГД перемешивателя, частично экранированное индуктором тигельной печи, проникает в объем металла, вследствие чего в расплаве возникают электромагнитные силы, обеспечивающие вынужденную конвекцию.

Поскольку величина и направление векторного поля электромагнитных сил в основном определяют интенсивность и характер течений, представляет интерес зависимость компонент их интегрального значения от таких параметров, как частота тока в катушках и положение МГД перемешивателя относительно тигельной печи. Анализ результатов решения электромагнитной задачи показал, что увеличение частоты приводит к росту электромагнитной силы, при этом соотношение ее тангенциальной (рисунок 9) составляющей к нормальной (рисунок 8) имеет максимум при частоте 5 Гц. Увеличение зазора между тигельной печью и МГД перемешивателем  $\Delta_{\text{ТП-МГД}}$  приводит к увеличению сопротивления рассеяния, а соответственно снижению электромагнитной силы. Минимально возможная величина этого зазора зависит от конструктивных параметров тигельной печи и, в данном случае, соответствует 75 мм. При перемещении МГД перемешивателя относительно тигельной печи по вертикальной оси происходит также изменение интегральной электромагнитной силы в металле. Максимум силы соответствует расположению, при котором центральный зубец перемешивателя расположен ровно на половине высоты расплава.

На основании полученных в результате решения электромагнитной задачи источников членов уравнений движения и энергии, был выполнен расчет и анализ интегральных и дифференциальных характеристик тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в тигельной печи и кристаллизующемся слитке.

Полученная картина температурного поля в прогретом тигле представлена на рис. 10. Как видно из рисунка, температурное поле неоднородно по вертикальной оси. В центральной части стенок тигля формируется изотермический слой с температурой 1000 К, в то время как дно тигля прогрето не более 800 К. В результате чего после заливки происходит расслоение температурного поля в расплаве относительно образованного изотермического пояса в тигле.

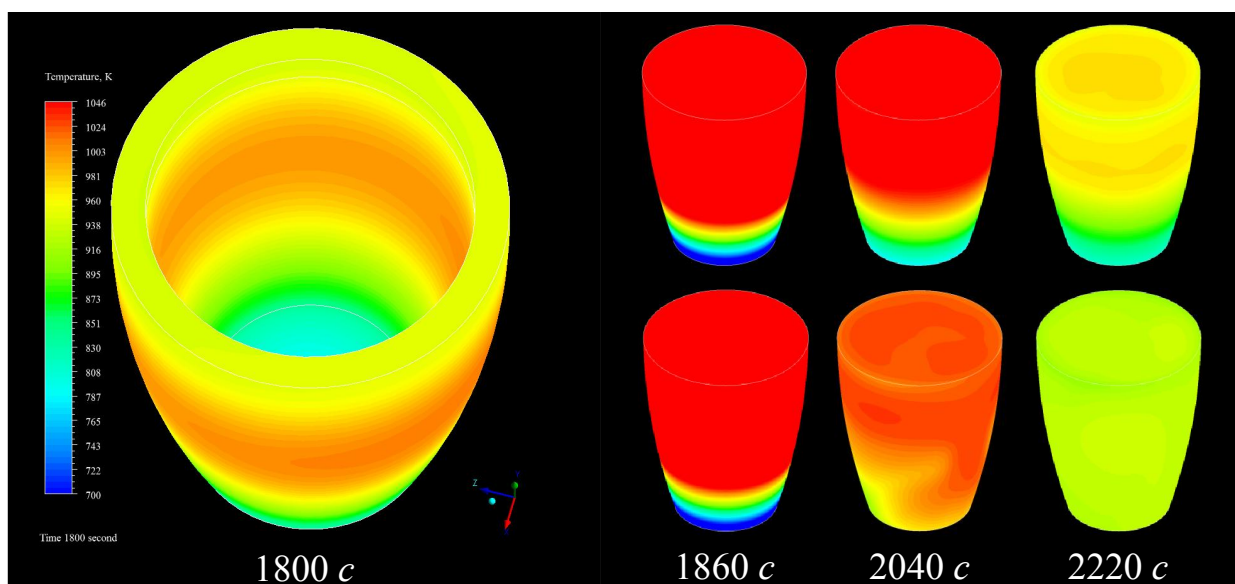


Рис. 10

Рис. 11

Для сравнительной оценки влияния МГД перемешивания на процесс приготовления расплава с момента времени 1860 с расчет выполнялся для двух случаев: с МГД воздействием и без него. Динамика температурного поля, для обоих случаев в интервале времени, соответствующем выдержке расплава, представлена на рисунке 11.

Как видно из рисунков, при выдержке расплава в интервале между включениями индуктора тигельной печи, без воздействия МГД перемешивателя, в металле сохраняется расслоение температурного поля по высоте. Силовое действие бегущего электромагнитного поля на расплав приводит его в движение против сил тяжести. В результате чего формируется контур циркуляции, замыкающийся через весь объем и полностью устраняющий перепад температуры в жидком металле за 140 секунд (рисунок 12). Следует отметить, что турбулентный характер течений расплава в печи от МГД воздействия приводит к увеличению эффективной теплопроводности в полтора раза от теплопроводности материала.

При приготовлении расплава в узком диапазоне температур без применения МГД перемешивания, на различных стадиях работы тигельной

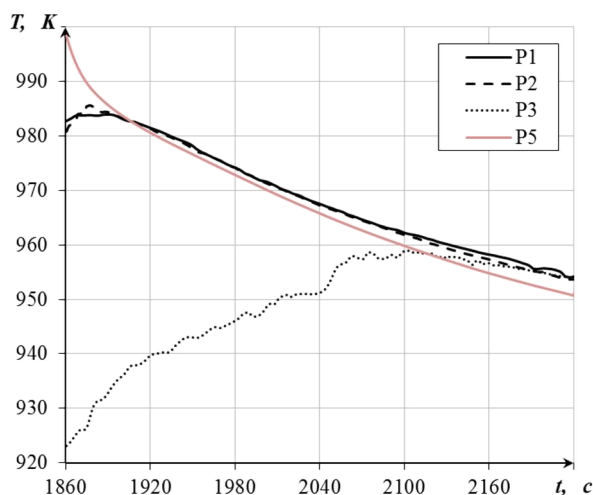


Рис. 12

печи возможен перегрев и застывание металла в тигле, в верхних и нижних слоях соответственно. Поскольку при МГД перемешивании температурное поле в тигле изменяется равномерно во всех точках, приготовление и поддержание температуры расплава возможно в очень узком диапазоне температур.

Таким образом, МГД перемешивание в процессе приготовления расплава позволяет повысить качество сплава за счет



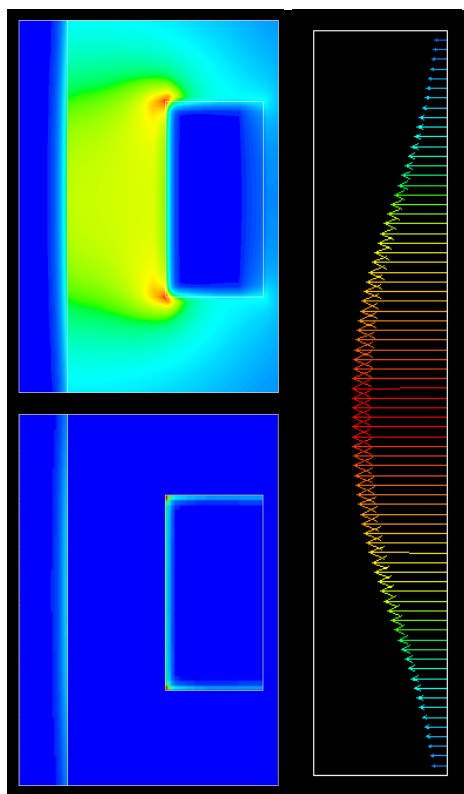


Рис. 13

Рис. 14

устранения зон перегрева и застывания расплава, а также интенсивного массообмена между различными зонами. Это сказывается на химической однородности расплава, от которой в дальнейшем будет зависеть равномерность распределения химических компонентов по длине слитка. Помимо химической однородности, качество структуры отливаемого в электромагнитный кристаллизатор слитка определяется высокой и равномерной скоростью кристаллизации в его поперечном сечении. Это зависит от характера протекания связанных тепловых и гидродинамических процессов, которые зависят от различных параметров системы.

Картины распределения в системе «индуктор – слиток» действующего значения магнитной индукции и плотности тока представлены на рисунке 13 сверху и снизу соответственно, векторное распределение

электромагнитных сил на поверхности слитка представлено на рисунке 14.

Поскольку удержание жидкой фазы слитка осуществляется за счет компенсации действия силы тяжести электромагнитными силами, при анализе системы необходимо соблюдать условие равенства гидростатического и электромагнитного давления в слитке:

$$p_{гсi} = \rho g(h_{жф} - y_i), \quad p_{эмi} = \sum_j (f_{эмi,j} x_{i,j}), \quad (18)$$

где  $i, j$  – индекс элементов в слитке по высоте и радиусу.

Для определения требуемой величины тока в индукторе фиксированной формы, для получения слитка заданного радиуса, была построена зависимость, связывающая данные параметры при различной

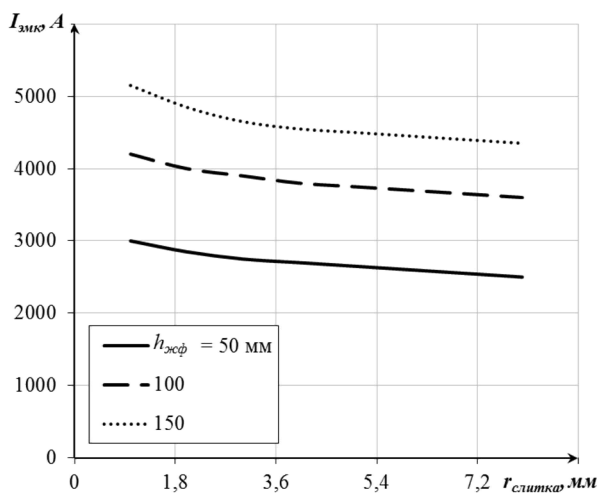


Рис. 15

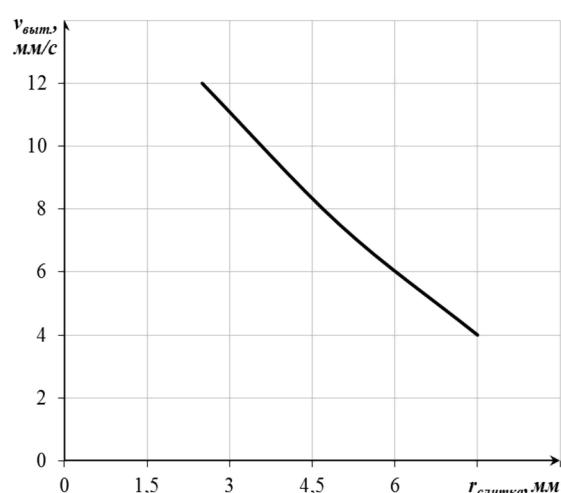


Рис. 16

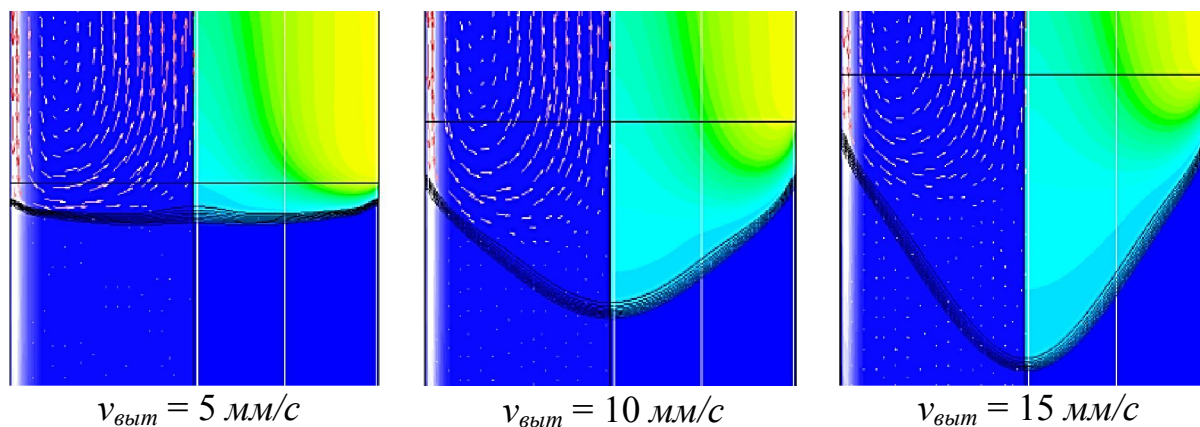


Рис. 17

высоте жидкой фазы (рисунок 15).

В результате решения термогидродинамической задачи были получены осредненное температурное поле и осредненное векторное поле скоростей, с формой фронта кристаллизации при различных параметрах системы (радиус слитка, частота, скорость вытягивания). На рисунке 17 представлена часть полученных результатов с ярко выраженным изменением формы фронта кристаллизации за счет увеличения скорости вытягивания слитка.

Из представленных рисунков видно, что область фазового перехода находится в зоне интенсивного течения при плоской форме фронта кристаллизации. При увеличении радиуса слитка или скорости его вытягивания, фронт кристаллизации вытягивается по длине слитка, тем самым выходя из зоны максимальных скоростей. Исходя из этого, была подобрана скорость вытягивания для соответствующего радиуса слитка, обеспечивающая наиболее плоский фронт (рисунок 16).

Однако, осредненное поле скоростей не дает полного представления о характере формирующихся течений. Для наиболее точной оценки влияния циркуляции на фронт кристаллизации, необходимо рассмотреть динамику поля скоростей, с учетом ее турбулентных пульсаций. Картины осредненного и мгновенного поля скоростей представлены на рисунке 18. На рисунке 19 показаны график динамики скорости в точках у фронта кристаллизации и

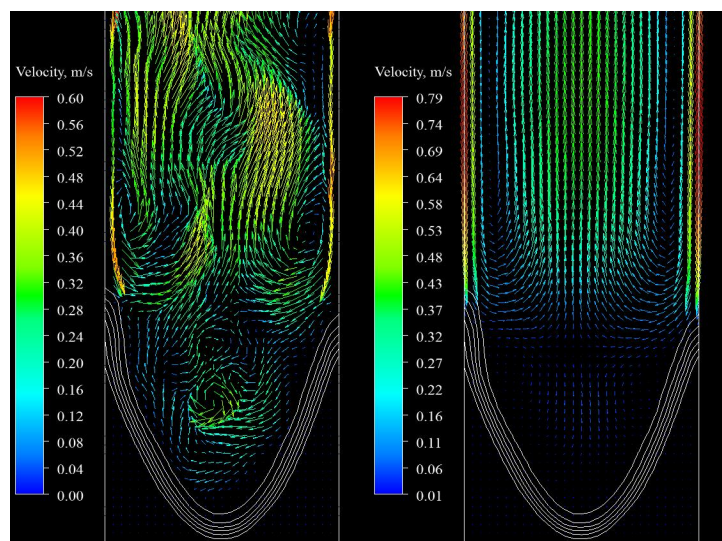


Рис. 18

спектральной плотности мощности при его плоской и вогнутой форме.

Как видно из графиков, максимальную энергию несут вихри у фронта кристаллизации, частота образования которых лежит в диапазоне до 5 Гц. При плоской форме фронта кристаллизации колебания во всех точках имеют одинаковый характер и большую энергию, что



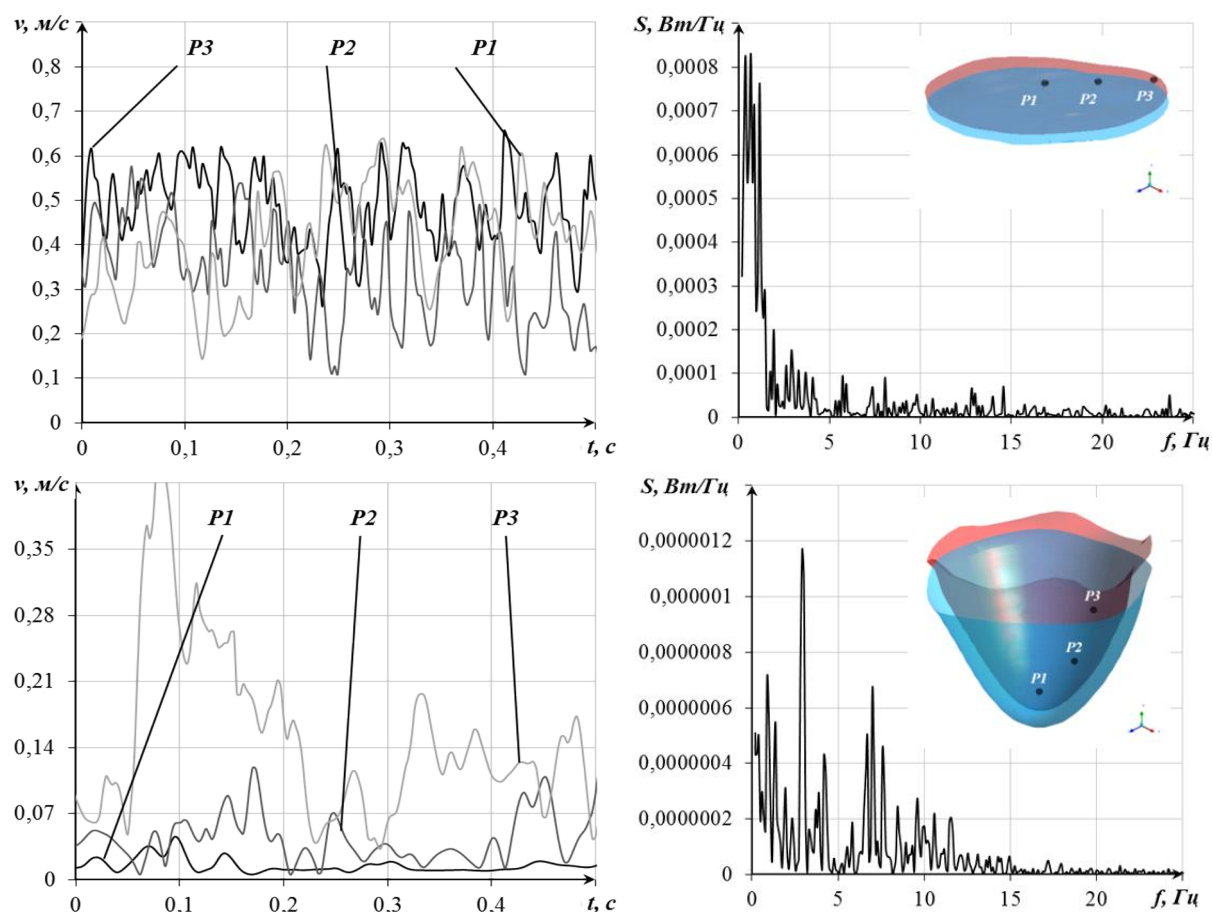


Рис. 19

говорит о более благоприятных условиях кристаллизации.

Пульсации скорости характеризуют наличие турбулентного режима и определяют величину прироста эффективной теплопроводности. Для оценки влияния эффективной теплопроводности на процессы кристаллизации был проведен анализ ее средней величины, в объеме вблизи фронта кристаллизации при различных параметрах системы. В результате анализа определено, что частота тока в индукторе практически не влияет на эффективную теплопроводность, увеличение скорости вытягивания или уменьшение радиуса слитка вдвое снижает эффективную теплопроводность на 20%.

**В четвертой главе** проведена верификация результатов математического моделирования и экспериментальных исследований влияния магнитогидродинамического перемешивания на качество получаемой прутковой заготовки.

Проверка адекватности построенной математической модели проводилась путем сравнения результатов моделирования гидродинамических процессов с известными экспериментальными данными, полученными для индукционной тигельной печи в институте электротермических процессов в Ганновере. Измерение скоростей проводилось с использованием магнитных датчиков скорости. Как показали измерения, основной спектр пульсаций лежал до 5 Гц. Сравнение экспериментальных данных и результатов математического моделирования



Рис. 20



Рис. 21



Рис. 22

показало, что среднее отклонение результатов не превышает 10%, что говорит о достаточной достоверности получаемых гидродинамических потоков с использованием математической модели.

Экспериментальное исследование физических процессов выполнялось на установке для литья прутковой заготовки малого поперечного сечения (рисунок 20). Для приготовления и выдержки расплава использовалась индукционная тигельная печь с графитовым тиглем емкостью 10 л. В качестве МГД перемешивателя была использована линейная индукционная машина в двухфазном исполнении с перекрещивающимися обмотками, установленными на магнитопроводе (рисунок 21). Электромагнитный кристаллизатор представляет собой медный водоохлаждаемый индуктор высотой 20 мм и спрей-охладитель с внутренним диаметром 18 мм (рисунок 22).



Рис. 23

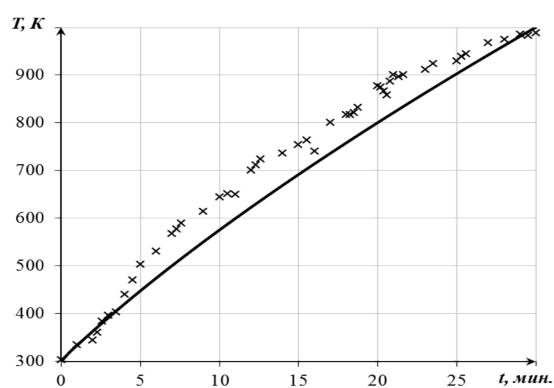


Рис. 24

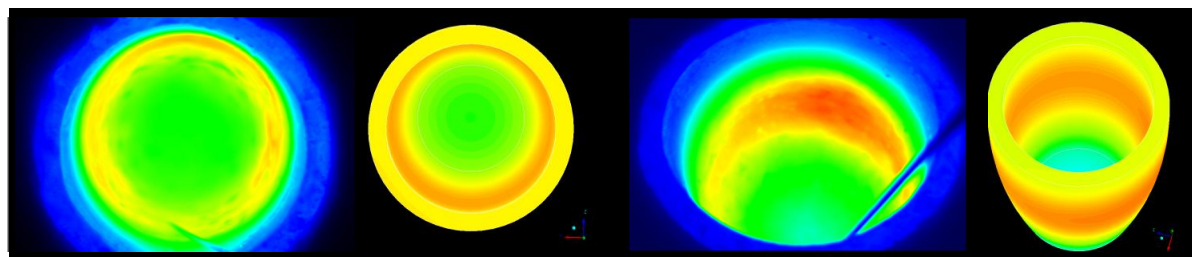


Рис. 25



Рис. 26

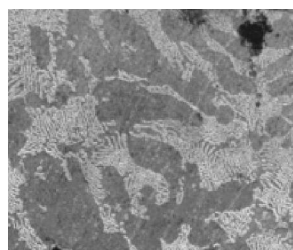


Рис. 27

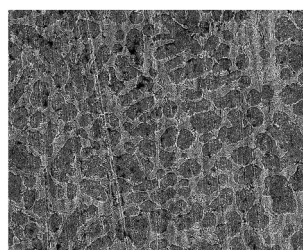


Рис. 28

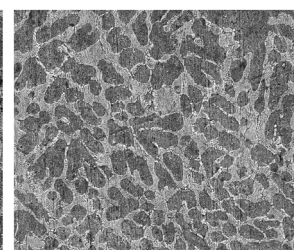


Рис. 29

При прогреве тигля контроль над температурой осуществляется по показаниям термопары, снимаемым с его внутренней поверхности (рисунок 23). Как видно из графика прогрева, характер кривой в рамках допустимой погрешности повторяет показания термопары (рисунок 24). Для получения

Таблица 1 – параметры установки

Описание	Значение
<i>тигельная печь</i>	
Объем тигля	6 л
Уровень металла	290 мм
Число витков	12
Ток	120 А
Частота тока	18000 Гц
<i>МГД перемешиватель</i>	
Габаритные размеры	315x165x85 мм
Число фаз	2
Число витков в пазу	95
Фазовый сдвиг	90 °
Ток	20 А
Частота тока	50 Гц
<i>электромагнитный кристаллизатор</i>	
Высота индуктора	20 мм
Толщина индуктора	10 мм
Высота жидкой фазы	100 мм
Ток	3500 А
Частота	60000 Гц

распределения температурного поля в тигле использовалась тепловизионная съемка. Как видно из тепловизионных снимков, в центральной части стенок тигля формируется пояс максимальных температур, что подтверждает результаты, полученные на математической модели (рисунок 25).

Для оценки влияния применения МГД перемешивания на структуру получаемых заготовок, на экспериментальной литейной установке были отлиты слитки диаметром 10 мм из высоколегированного сплава алюминия (рисунок 26). Также, для сравнения, был получен образец, закристаллизованный в медной водоохлаждаемой гильзе. Как видно из снимков микроструктуры, образцы, отлитые в

электромагнитный кристаллизатор (рисунок 28 и 29), имеют существенно меньший размер зерна, чем образец, полученный в медной гильзе (рисунок 27). Также видно, что структура на поверхности (рисунок 28) и в сердцевине (рисунок 29) слитка одинакова, что говорит о благоприятном влиянии МГД перемешивания и правильном выборе параметров системы.

Итоговые геометрические и энергетические параметры индукционной установки приведены в таблице 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведенный анализ современных способов и устройств, обеспечивающих МГД воздействие на расплав, позволил предложить индукционную установку, осуществляющую комплексное МГД воздействие на расплав в процессе приготовления, разливки и кристаллизации.

2. Проведенный обзор методов и средств математического моделирования и их возможностей определил выбор программных продуктов ANSYS и FLUENT для анализа физических процессов в индукционной установке, позволяющих наиболее полно учесть особенности протекания этих процессов.

3. Построенные в диссертационной работе математические модели, для анализа сопряженных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в индукционной установке, позволяют учитывать динамику турбулентных пульсаций в расплаве и их влияние на процессы теплообмена.

4. Построенные математические модели позволили выявить влияние механической энергии, передающейся электромагнитным полем в расплав, на тепловые и гидродинамические процессы, протекающие в индукционной установке, а именно: увеличение на 30% эффективной теплопроводности расплава (до  $130 \text{ Вт/(м·К)}$ ) за счет применения МГД перемешивания, что приводит к интенсификации процессов теплообмена в печи и кристаллизующемся расплаве; увеличение энергии турбулентных пульсаций в расплаве до  $0,8 \text{ мДж}$ , что приводит к интенсификации механического воздействия на кристаллизующийся расплав и обеспечивает равномерную мелкозернистую структуру слитка.

5. Анализ физического воздействия МГД перемешивания на жидкий металл в индукционной установке позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным является комплексное воздействие электромагнитного перемешивания на расплав - бегущим электромагнитным полем, в процессе его приготовления и разливки, и пульсирующим электромагнитным полем, в процессе его кристаллизации.

6. Определена комбинация синтезируемых электромагнитных параметров оборудования индукционной установки, обеспечивающая режим работы, при котором осуществляется устойчивое формирование слитка с равномерным распределением свойств как в поперечном сечении, так и по его длине.

7. Разработанные рекомендации по выбору параметров индукционной установки использованы при проектировании и создании опытно-промышленной установки, что позволило обеспечить ее эффективную работу в требуемых технологических режимах.

8. Разработанные алгоритмы и программы, а также отдельные элементы индукционной установки с МГД перемешиванием защищены свидетельствами и патентами: №2477193, №2011611973, №2011619131, №2011619130, №2013611431.



**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах (статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях рекомендованных ВАК):**

1. Численный анализ электрических процессов при кристаллизации слитка в магнитном поле / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин, А. Б. Кувалдин, Е. А. Головенко // Вестн. МЭИ. – 2009. – № 5. – С. 49–54.

2. Решение вопросов безопасности экспериментальной установки для получения прутка из алюминиевых сплавов с использованием электромагнитного кристаллизатора / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин, Т. В. Игнатенко // Вестн. МАНЭБ. – 2009. – № 5. – С. 65–70.

3. МГД–процессы в жидкой фазе слитка, формирующегося в магнитном поле / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин, Е. А. Головенко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 26–30.

4. Быстрая кристаллизация высоколегированных алюминиевых сплавов в электромагнитном поле / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин, Д. К. Фигуровский, Е. А. Головенко, Н. В. Сергеев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 47–51.

5. Математическое моделирование электромагнитных и термогидродинамических процессов в системе «индуктор – слиток» электромагнитного кристаллизатора / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин, А. В. Минаков, Н. В. Сергеев // Магнитная гидродинамика. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 3–11.

6. Электромагнитный кристаллизатор для получения непрерывно литых слитков с высокими скоростями охлаждения / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин, Н. В. Сергеев // Изв. РАН. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 3–14.

7. Управление конвективными потоками расплава в канальной части индукционной печи / **М. Ю. Хацаюк**, В. Н. Тимофеев // Изв. РАН. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 15–24.

8. Магнитогидродинамические технологии в плавно-литейном производстве алюминиевых сплавов / **М. Ю. Хацаюк**, В. Н. Тимофеев, М. В. Первухин // Индукционный нагрев. – 2012. – № 4. – С. 15–21.

9. Пат. 2477193 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/01, В 22 D 27/02. Способ получения слитка из сплавов цветных металлов / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин, В. Н. Тимофеев, Н. В. Сергеев, Р. М. Христинич. – № 2011106625/02; заявл. 22.02.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл № 7.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611973. Программа для расчета параметров системы «индуктор-слиток» в среде ANSYS / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин. – Регистр. 04.03.2011 г.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011619131. Программа импорта и интерполяции источниковых членов уравнений движения и энергии для решения 2D-задачи во FLUENT / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин. – Регистр. 24.11.2011 г.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011619130. Программа импорта и интерполяции источниковых членов уравнений движения и энергии для решения 3D-задачи во FLUENT / **М. Ю. Хацаюк**, М. В. Первухин. – Регистр. 24.11.2011 г.

Подписано в печать 03.09.2013 г. Печать плоская  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,4  
Тираж 100 экз. Заказ № 3068

Отпечатано полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а,  
Тел.: +7(391) 206-26-49, 206-26-67  
E-mail: print\_sfu@mail.ru